不同成熟阶段及品种对全株小麦营养成分和瘤胃降解特性的影响

胡志勇　张　甜　王金新　董旭晟　林雪彦*　王中华*

（山东农业大学动物科技学院，泰安　271018）

摘　要：本研究旨在通过研究不同成熟阶段及品种对全株小麦营养成分和瘤胃降解特性的影响，为全株小麦应用于奶牛饲粮提供数据参考。试验采用山农 22026(SN22026)和山农 82567(SN82567)2 个品种的小麦，样品采集期为 2015 年 3 月下旬至 6 月中旬。试验测定了不同成熟阶段全株小麦干物质（DM）、粗蛋白质（CP）、淀粉、粗灰分、有机物、中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）、酸性洗涤木质素（ADL）含量及饲料相对饲喂价值，并用 3 头体重约 500 kg 的装有瘤胃瘘管荷斯坦奶牛测定了小麦瘤胃降解率。结果表明：1）蜡熟期全株小麦的 DM 含量显著高于其他各期($P<0.05$)；全株小麦的 CP 含量在成熟过程中逐渐减少，开花期后 CP 含量保持稳定；随着小麦的成熟，全株小麦的 NDF、ADF 和 ADL 含量呈先增加后减少的趋势。2）全株小麦单位 DM 的总能在成熟过程中呈下降趋势，泌乳净能呈先下降后增加的趋势。3）全株小麦 DM、CP 和 NDF 的有效降解率在拔节期最高，抽穗期和开花期显著降低($P<0.05$)，乳熟期和蜡熟期又显著升高($P<0.05$)。4）全株小麦的瘤胃降解蛋白质(RDP)含量在拔节期最高，显著高于其他各期($P<0.05$)；抽穗期显著降低($P<0.05$)，开花期降至最低($P<0.05$)，开花期后逐渐升高($P>0.10$)；而瘤胃非降解蛋白质含量在小麦成熟过程中逐渐下降，蜡熟期最低，显著低于其他各期($P<0.05$)。由此可见，本试验 2 个品系全株小麦相比，仅在几个指标中有显著差异。每个成熟阶段的全株小麦饲养价值都很高，但不同成熟阶段全株小麦的营养价值、产量和瘤胃降解特性存在显著的差异。

关键词：全株小麦；奶牛；营养成分；瘤胃降解率

中图分类号：S816.5+1；S823

收稿日期：2017-10-18

基金项目：国家自然科学基金（31772624）；国家自然科学基金（31572427）；国家现代农业（奶业）产业技术体系（CARS-36）；山东省牛产业技术体系（SDAIT-12-011-06）

作者简介：胡志勇（1980—），男，黑龙江望奎人，讲师，博士，从事反刍动物营养研究。E-mail: hzy20040111@126.com

*通信作者：林雪彦，教授，博士生导师，E-mail: linxueyan@sdau.edu.cn；王中华，教授，博士生导师，E-mail: zhwang@sdau.edu.cn

小麦是世界上种植最多的农作物之一，因其可消化纤维和能量较高，全株小麦适合作为高产奶牛或肉牛的优质饲料作物，饲喂价值接近玉米青贮[1]。全株小麦营养价值高，在以色列、土耳其以及美国的一些地区被广泛用于奶牛饲料。2016 年中央一号文件提出：扩大粮改饲试点，加快建设现代饲草料产业体系。近年，随着我国奶牛业的发展，国产优质粗饲料难以满足牧场发展的需要，因此充分开发利用本地粗饲料资源是大势所趋，小麦在奶牛生产上的应用逐渐受到关注。

将全株小麦应用于奶牛饲料，必须要明确全株小麦成长过程中营养价值的特性及其变化规律，以确定全株小麦最佳刈割时期，但关于小麦的很多研究结果存在着差异[2-4]，目前我国对全株小麦的研究很少，关于全株小麦瘤胃降解率方面的研究仍未见报道。因此，本试验旨在通过对全株小麦生长过程中营养成分及瘤胃降解特性变化规律的研究，为全株小麦在奶牛饲粮上的应用提供数据参考，希望本研究能够在开发本地粗饲料资源和减少进口粗饲料方面具有一定的借鉴意义。

1　材料与方法

1.1　试验材料的采集

试验所用小麦于 2014 年 10 月 10 日在山东农业大学农学院试验田的 2 个地块播种，2 个地块的小麦品种分别属于山农 22026(SN22026)和山农 82567(SN82567)，播种量每亩（1 亩≈666.67 m^2）15 万株，播种地在山东泰安。

样品的采集时间为 2015 年 3 月下旬(拔节期)至 6 月中旬(成熟收割)，采样期共 11 个周，拔节期（1、2 周）、抽穗期（3、4 周）、开花期（5、6 周）、乳熟期（7、8、9 周）、腊熟期（10、11 周），每周四采样 1 次，采样时，从距离地头 2 m 处开始纵向采样，随机采集植株，但避免采集相邻的植株。每个地块每次采集 100 个植株，每个地块的小麦样品分成 2 份，分别用于测定营养成分含量和瘤胃降解参数。

采样后，立即将样品放入 65 ℃电热恒温烘箱内烘至恒重，然后回潮 24 h 测定植株初水分含量。使用植物样品粉碎机将回潮后的风干样品分别粉碎至 40 和 7 目，分别用于测定常规营养成分含量和瘤胃降解参数。

1.2　瘤胃降解率的测定

瘤胃降解率的测定采用尼龙袋法：2 个品种小麦在 2 个地块播种，每个地块的小麦样品分成 2 份，使用电子分析天平准确称量粉碎至 7 目的全株小麦样品(3 g 左右)和尼龙袋(孔径：50 μm，大小：8 cm×12 cm)的重量，并将样品放于尼龙袋内。将装有样品的尼龙袋固定在橡胶软塞上，然后放入尼龙网兜(长度约 50 cm)内。

试验动物为 3 头健康的泌乳中期经产荷斯坦奶牛，体重 500 kg 左右，装有永久性瘤胃瘘管，平均产奶量 25 kg/d。每天挤奶 2 次(06:30 和 18:30)，饲喂 2 次(08:30 和 15:30)，自由采食和饮水，饲粮组成见表 1。

表 1　饲粮组成(干物质基础)

Table 1　Composition of the diet （DM basis）　%

原料 Ingredients	含量 Content
玉米 Corn	18.61
麸皮 Wheat bran	10.29
豆粕 Soybean meal	10.29
苜蓿干草 Alfalfa hay	19.99
燕麦草 Oaten hay	5.29
羊草 Wild-rye hay	5.29
全株玉米青贮 Whole corn silage	28.24
预混料 Premix	2.00
合计 Total	100.00

每千克预混料包含 One kg of premix contained the following：VA 160 000 IU，VD_3 30 000 IU，VE 300 mg，VK_3 30 mg，P 80 mg，Mn 550 mg，Zn 750 mg，NaCl 80 mg，Ca 200 mg，Cu 400 mg，Fe 1 800 mg。

在晨饲前 1 h 将尼龙网兜放入瘤胃内，固定网兜另一端于奶牛瘤胃瘘管上。每个样品分成 3 份分别放入 3 头奶牛的瘤胃。根据测定所需样品残渣量，每隔相应时间取出一定数量的尼龙袋。样品的培养时间为 2、4、8、12、24、48 和 72 h 7 个时间点。每个时间点饲料样品设 2 个重复，每个尼龙袋中的样品为 1 个重复。样品取出后立即用清水冲洗尼龙袋至水清，冲洗过程中严格防止尼龙袋中残渣样品的逃逸。将冲洗干净的尼龙袋置于电热恒温烘箱内，65 ℃烘干样品至恒重，然后称重。测定分析残渣样品中的营养成分含量。每个品种的计算

指标取各成熟期测定平均值。

1.3 降解率参数的计算

根据 t 时间待测样品中目标成分的实时瘤胃降解率，使用 SAS 8.2 中的非线性回归程序和冯仰廉[5]提出的瘤胃降解率的指数曲线计算：

$P=a+b(1-e^{-ct})$[5]。

式中：P 为 t 时间点（h）蛋白质的瘤胃降解率（%）；a 为快速降解部分（%）；b 为慢速降解部分（%）；c 为 b 的降解速率（%/h）。

1.4 有效降解率(effective degradability)的计算

利用上述计算结果中 a、b、c 的值，计算待测样品目标成分的有效降解率，公式如下：$ED=a+bc/(c+Kp)$[5]。

式中：ED 为蛋白质有效降解率（%）；Kp 为瘤胃外流速度（%/h）。

其中瘤胃外流速率采用 NRC(2001)中的预测方程：

$Kp=3.362+0.479X_1-0.007X_2-0.017X_3$[6]。

式中：Kp 为瘤胃外流速度（%/h）；X_1 为干物质采食量占试验动物体重的比例（%）；X_2 为试验饲粮中精料所占的比例（%）；X_3 为试验饲粮干物质中中性洗涤纤维（NDF）所占的比例（%）。

本试验中所用试验奶牛为中等体重的荷斯坦奶牛，干物质采食量占动物体重的 3.4%，饲粮中精料含量为 50%，饲粮干物质(DM)中 NDF 含量为 25%，根据上述公式计算得到瘤胃外流速度 Kp 为 4.2%/h。

1.5 饲料相对饲喂价值(relative feed value，RFV)的计算

RFV 是一种被广泛接受的饲料质量指标，在美国干草市场已经成为确定干草质量的常用工具。它是由美国饲草和草原理事会下属的干草市场特别工作组（Hay Marketing Task Force of the American Forage and Grassland Council）开发的，RFV 是由酸性洗涤纤维（ADF）和 NDF 估算而来的，计算公式如下：

$DDM=88.9-0.779\times ADF$；

$DMI=120/NDF$；

$RFV=(DDM\times DMI)/1.29$。

式中：DMI(dry matter intake)为粗饲料的干物质采食量，用占体重(BW)的百分比表示；DDM(digestible dry matter)为可消化干物质，用占 DM 的百分比表示；1.29 是基于大量动物试验数据所预期的盛花期苜蓿 DDM，以占体重的百分比表示，除以 1.29，目的是使得盛花期的苜蓿 RFV 值为 100。

1.6　瘤胃和小肠指标的计算

瘤胃和小肠指标的计算参考冯仰廉主编的《奶牛营养需要和饲料成分》[7]。

饲料瘤胃发酵产生的能量以瘤胃可发酵有机物（FOM)、可消化有机物（DOM)等形式表达，并影响瘤胃微生物蛋白质(MCP)产量。在我国的小肠蛋白质体系中，每千克 FOM 可支持合成 136 g MCP（MCPE)。由瘤胃降解蛋白质（RDP）产量及其转化为 MCP 的效率计算饲料氮源可支持的 MCP 产量。两者的最小值即是 MCP 的理论产量（MCPN)。

瘤胃能氮平衡（RENB）=MCPE－MCPN。

MCP（FOM）为根据 FOM 测算的 MCP 产量。MCP（RDP）为根据 RDP 测算的 MCP 产量。单个饲料和饲粮的 RDP 转化物为 MCP 的效率均按 90％计算，即 MCP=RDP×0.9。

饲料能量可支持的瘤胃 MCP 合成量：

MCPE(g)＝136×FOM（kg）。

饲料 RDP 可支持的瘤胃 MCP 合成量：

瘤胃可降解饲料氮（RDN）转化为瘤胃微生物氮（MN）的效率可由 RDN（g）与饲料 FOM（kg）含量之比预测，回归公式为：

MN/RDN＝3.625 9-0.845 7ln(RDN/FOM)；

MCPN＝RDN×（MN/RDN）；

小肠蛋白质＝饲料瘤胃非降解蛋白质＋瘤胃 MCP；

小肠可消化蛋白质＝饲料瘤胃非降解蛋白质×小肠消化率＋瘤胃 MCP×小肠消化率。

小肠蛋白质消化率：MCP 消化率取 0.7，饲料非降解蛋白质消化率取 0.65。小肠可消化蛋白质的转化效率：生长奶牛取 0.6，泌乳奶牛取 0.7。

1.7　全株小麦样品及瘤胃降解残渣的测定

DM 含量测定参照 GB 6435—1986 的方法，粗蛋白质（CP）含量的测定参照 GB/T 6432—1994 的方法，粗灰分（Ash）含量的测定参照 GB/T 6438—1986 的方法，粗脂肪（EE）

含量的测定参照 GB/T 6433—2006 的方法，NDF、ADF、酸性洗涤木质素（ADL）含量的测定参照 Van Soest（1991）提出的方法；全株小麦样品的淀粉含量的测定使用蒽酮比色法，参考陈钧辉编著的《生物化学实验》。非纤维性碳水化合物(NFC)含量按公式计算：

NFC（%）=100–(CP+NDF+EE+Ash)。

根据测定的 CP、Ash、EE、NDF 和 ADF 含量，参考法国国家农业研究院（INRA）（1978、1988、2000）的公式计算出总能（GE)、泌乳净能（NE_L）：

GE=17.3+0.061 7CP+0.219 3EE+0.038 7CF-0.186 7Ash+0.19；

NE_L=ME×K_l。

K_l=0.60+0.24×(ME/GE-0.57).。

式中：CF 为粗纤维含量；ME 为代谢能。

1.8　数据统计分析

测定结果使用 Excel 2016 进行预处理，然后使用 SAS 8.2 软件进行线性模型方差分析和多重比较。P<0.05 表示差异显著，P>0.10 表示差异不显著，0.05≤P≤0.10 表示差异有显著趋势。

2　结果与分析

2.1　不同成熟阶段及品种对全株小麦营养成分的影响

由表 2 可知，随着小麦的成熟，全株小麦 DM 含量逐渐增加，而且增加速度逐渐加快，特别是在蜡熟期，全株小麦的 DM 含量显著增加(P<0.05)。全株小麦的 CP 含量在成熟过程中逐渐减少，拔节期最高，抽穗期和开花期显著减少(P<0.05)，开花期后 CP 含量保持稳定。随着小麦的成熟，全株小麦的 NDF、ADF 和 ADL 含量都是呈现先增加后减少的趋势；NDF 含量在抽穗期最高，而 ADF 和 ADL 含量在开花期最高。NFC 含量变化呈现先减少后增加的趋势，而淀粉含量在开花期及以前保持稳定，开花期以后显著增加(P<0.05)。不同品种之间的营养成分无显著差异(P>0.10)。

表 2　不同成熟阶段及品种对全株小麦营养成分的影响

Table 2　Effects of different maturity stages and breeds on nutritional components of whole crop wheat

项目 Items	成熟阶段 Maturity stage	品种 Breed	SEM	*P* 值

	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	乳熟期 Milk stage	腊熟期 Dough stage	SN22026	SN82567		*P*-value
干物质 DM/%	16.65^{c}	19.97^{c}	22.67^{bc}	28.78^{b}	77.73^{a}	33.86	32.45	7.56	<0.000 1
粗蛋白质 CP/%DM	21.00^{a}	15.19^{b}	12.34^{c}	11.95^{c}	11.07^{c}	15.12	13.50	1.24	0.000 3
中性洗涤纤维 NDF/%DM	47.43^{c}	63.57^{a}	58.01^{b}	56.95^{b}	55.76^{b}	55.29	57.40	1.81	0.006 6
酸性洗涤纤维 ADF/%DM	28.12^{b}	35.84^{a}	34.81^{a}	26.69^{bc}	22.92^{c}	28.74	30.61	1.70	0.003 7
酸性洗涤木质素 ADL/%DM	2.33^{d}	5.00^{ab}	5.84^{a}	4.23^{bc}	3.63^{c}	3.91	4.50	0.42	0.004 3
非纤维性碳水化合物 NFC/%DM	15.52^{c}	7.84^{d}	16.04^{c}	20.73^{b}	25.40^{a}	16.38	17.22	1.97	0.017 0
淀粉 Starch/%DM	8.54^{c}	6.91^{c}	7.88^{c}	18.66^{b}	22.59^{a}	12.73	13.09	2.16	0.000 5

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著（P<0.05），相同或无字母表示差异不显著（P>0.10）。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference (P>0.10). The same as below.

2.2 不同成熟阶段及品种对全株小麦能量、产量和 RFV 的影响

由表 3 可知，随着小麦的成熟，全株小麦单位 DM 的 GE 呈下降趋势。随着小麦的成熟，泌乳净能呈先下降后增加的趋势，抽穗期和开花期泌乳净能最低，显著低于其他各期(P<0.05)；乳熟期和蜡熟期最高，显著高于其他各期(P<0.05)。随着小麦的成熟，单株小麦的 DM 产量增加，拔节期最低，显著低于其他各期(P<0.05)；乳熟期和蜡熟期最高，显著高于其他各期(P<0.05)。全株小麦在拔节期有最高 RFV，抽穗期和开花期显著降低(P<0.05)，

乳熟期和蜡熟期逐渐升高($P>0.05$)。不同品种之间全株小麦的能量、产量和 RFV 无显著差异($P>0.10$)。

表 3　不同成熟阶段及品种对全株小麦能量、产量和 RFV 的影响

Table 3　Effects of different maturity stages and breeds on energy, yield and RFV of whole crop wheat

项目 Items	成熟阶段 Maturity stage					品种 Breed		SEM	P 值 P-value
	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	乳熟期 Milk stage	腊熟期 Dough stage	SN22026	SN82567		
总能 GE/(MJ/kg)	18.08[a]	17.75[bc]	17.75[bc]	17.92[ab]	17.58[c]	4.28	4.24	0.02	0.055 1
泌乳净能 NE_L/(MJ/kg)	5.86[b]	4.94[c]	5.11[c]	6.03[a]	6.32[a]	1.38	1.32	0.04	0.003 0
干物质产量 DM yield/(g/株)	6.15[c]	13.74[b]	17.22[b]	28.87[a]	29.61[a]	19.87	18.36	3.03	0.000 6
相对饲喂价值 RFV	132.10[a]	89.25[d]	99.11[cd]	111.32[bc]	118.53[ab]	113.76	106.36	5.31	0.018 9

2.3　不同成熟阶段及品种对全株小麦瘤胃降解率特性的影响

由表 4 可知，不同成熟阶段显著影响全株小麦的瘤胃降解率($P<0.05$)。DM、CP 和 NDF 有效降解率在拔节期最高，抽穗期和开花期显著降低($P<0.05$)，乳熟期和蜡熟期又显著升高($P<0.05$)。GE 有效降解率呈现不规律性，拔节期最高，显著高于其他各期($P<0.05$)；抽穗期和蜡熟期最低，显著低于其他各期($P<0.05$)。全株小麦在拔节期有较高的有机物质降解率，抽穗期和开花期显著降低($P<0.05$)，而在乳熟期和蜡熟期又显著增加($P<0.05$)。

表 4　不同成熟阶段及品种对全株小麦瘤胃降解率特性的影响

Table 4　Effects of different maturity stages and breeds on characteristics of rumen degradation rate of whole crop wheat　%

项目 Items	成熟阶段 Maturity stage					品种 Breed		SEM	P 值 P-value
	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	乳熟期 Milk stage	腊熟期 Dough stage	SN22026	SN82567		
DM 有效降解率 Effective degradability of DM	64.02[a]	49.10[c]	46.80[d]	51.07[b]	50.66[b]	52.93[a]	51.85[b]	2.01	<0.000 1
CP 有效降解率 Effective degradability of CP	67.86[a]	58.54[b]	49.35[c]	57.17[b]	65.91[a]	62.04[a]	57.49[b]	2.38	0.004 4
NDF 有效降解率 Effective degradability of NDF	44.08[a]	34.23[b]	24.80[d]	29.40[c]	25.41[d]	31.32	31.84	2.37	0.000 1
总能有效降解率 Effective degradability of GE	61.21[a]	45.64[c]	42.52[d]	48.02[b]	44.67[c]	48.97[a]	47.85[b]	2.22	<0.000 1
有机物质降解率 OM degradability	53.69[b]	43.28[c]	45.45[c]	57.02[b]	62.36[a]	53.59	51.14	2.44	0.002 4

2.4　不同成熟阶段及品种对全株小麦 RDP 和小肠蛋白质含量的影响

由表 5 可知，全株小麦的 RDP 含量在拔节期最高，显著高于其他各期(P<0.05)，抽穗期显著降低(P<0.05)，开花期降至最低(P<0.05)，开花期后逐渐升高(P＞0.05)；而瘤胃非降解蛋白质（RUP）的含量随着小麦的成熟逐渐下降，蜡熟期最低，显著低于其他各期(P<0.05)。根据 FOM 测算的 MCP 产量和根据 RDP 测算的 MCP 产量都呈现先降低后升高的趋势，但是前者的最高值在蜡熟期，后者的最高值在拔节期。瘤胃能氮平衡(RENB)在拔节期和抽穗期为负值，开花期以及开花期后为正值，且开花期最接近 0。全株小麦的小肠蛋白质和小肠

可消化蛋白质含量随着小麦的成熟逐渐降低，在拔节期最高，显著高于其他各期(P<0.05)，蜡熟期最低。

表 5　不同成熟阶段及品种对全株小麦 RDP 和小肠蛋白质含量的影响

Table 5　Effects of different maturity stages and breeds on rumen degradation protein and small intestinal protein contents of whole crop wheat

项目 Items	成熟阶段 Maturity stage					品种 Breed		SEM	P 值 P-value
	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	乳熟期 Milk stage	腊熟期 Dough stage	SN22026	SN82567		
瘤胃降解蛋白质 RDP/(g/kg)	143.04[a]	89.16[b]	61.08[c]	68.38[bc]	73.01[bc]	95.53	78.34	10.38	0.002 4
瘤胃非降解蛋白质 RUP/(g/kg)	66.97[a]	62.74[a]	62.32[a]	51.15[d]	37.73[c]	55.68	56.68	3.61	0.005 4
根据 FOM 测算的 MCP 产量 MCP（FOM）/(g/kg)	64.91[c]	52.23[d]	55.80[b]	71.84[b]	79.93[a]	66.40	63.48	3.45	0.001 0
根据 RDP 测算的 MCP 产量 MCP（RDP）/(g/kg)	128.74[a]	80.25[b]	54.97[c]	61.55[bc]	65.71[bc]	85.98[a]	70.50[b]	9.34	0.002 4
瘤胃能氮平衡 RENB/g	-63.83[c]	-28.02[b]	0.82[a]	10.29[a]	14.22[a]	-19.57[b]	-7.03[a]	10.03	0.000 5
小肠蛋白质 Small intestinal protein/(g/kg)	195.70[a]	142.99[b]	117.30[c]	112.69[cd]	103.44[d]	141.66[a]	127.18[b]	11.41	0.000 2
小肠可消化蛋白质 Small intestinal	133.64[a]	96.95[b]	78.99[c]	76.33[c]	70.52[c]	96.38[a]	86.19[b]	7.87	0.000 3

digestible protein

/(g/kg)

3 讨 论

3.1 不同成熟阶段及品种对全株小麦营养成分的影响

根据小麦籽粒形成的阶段和灌浆期小麦增重的特点，小麦自开花到成熟可以大致分为3个阶段：籽粒形成、灌浆增重和迅速脱水。小麦籽粒的形成过程决定了籽粒内胚乳细胞的数量，这和成熟后籽粒重量有着密切的联系。在籽粒形成期间，主要是籽粒体积的快速膨胀，小麦籽粒的含水量最高，DM的增加也慢。在小籽粒形成后，籽粒增重逐渐加快，进入灌浆增重的过程，这个过程会一直持续到小麦籽粒干重的最大值，在这个过程中小麦植株中的营养成分会快速地转移到小麦粒中。籽粒灌浆过程中，体积继续增大，增大至高峰后进入迅速脱水期，这个时期较短，水分快速散失，进入蜡熟期后，小麦植株叶片和茎干也会发黄，干枯，最后蜡熟末期至完熟期，全株小麦的DM含量会逐渐增加。Crovetto等[3]用孕穗期、开花期、乳熟期和蜡熟期小麦进行试验，发现小麦成熟度越高，DM含量越高；秦梦臻等[8]的研究也证明了随着成熟期全株小麦的含水量减少，也就是DM含量增加，这与本研究的结果一致。

随着小麦的成熟，全株小麦的CP含量降低，成熟阶段越晚，植株的光合作用越弱，抑制了蛋白质的合成。Throop[9]、秦梦臻等[8]、Crovetto等[3]和Xie等[4]的试验中也报道了植株的成熟会降低全株小麦的CP含量，但Oltjen等[10]报道，蜡熟期的全株小麦青贮比乳熟期的CP含量更高。

不同成熟阶段全株小麦纤维素类物质(NDF、ADF和ADL)含量不同。大量的研究表明，随着植株的成熟，牧草中细胞壁成分增加，纤维素类物质含量也会增加。在本试验中，纤维素类物质含量先增加后减少，开花期之后，乳熟期、蜡熟期有更低的纤维类物质含量，这可能是小麦籽粒形成后，在灌浆过程中，籽粒中淀粉不断沉积使纤维素含量相对下降。Crovetto等[3]报道了全株小麦的NDF和ADF含量在抽穗期至乳熟期相对稳定，在蜡熟期减少，而ADL含量逐渐增加。Xie等[4]的试验中发现，乳熟期的粗纤维（CF）、NDF和ADF含量显著低于开花期和蜡熟期。

NFC含量变化呈现先减少后增加的趋势，而淀粉含量在开花期及以前保持稳定，开花

期后显著增加。这说明开花期以前全株小麦 NFC 中淀粉以外的糖类会减少，而开花后植株的大部分糖类转移到籽粒中以淀粉的形式存在。Beck 等[11]用全株小麦调制成干草作为肉犊牛粗饲料，也发现蜡熟期的全株小麦比孕穗期有更高的 NFC 含量，而且在孕穗期，调制成干草比制成青贮饲料的全株小麦有更高的洗涤纤维含量，但 NFC 的含量较低，这可能是因为水溶性碳水化合物在固化过程中被消耗损失了，或通过美拉德反应并入到 NDF 中，又或者因为暴露在空气中流失了。而这种损失在小麦乳熟期和蜡熟期会变小，因为在成熟后期，大部分 NFC 以淀粉这种更稳定的形式存在于小麦籽粒中。

3.2 不同成熟阶段及品种对全株小麦能量、产量和 RFV 的影响

饲料的 GE 是单位 DM 的饲料经过氧化燃烧后释放的热量，而碳、氢、氧的比例决定了有机物质的氧化程度，饲料 GE 的大小由其单位 DM 有机物质的含量和有机物质的碳、氢、氧比例确定。成熟过程中全株小麦单位 DM 的 GE 呈下降趋势，但是在每个阶段的能量都很高。Crovetto 等[3]的试验中 GE 在各个阶段也都很高，并且随着小麦成熟逐渐减少，这与本试验的研究结果一致。特别的是，Crovetto 等[3]的试验中 GE 高于本试验中的值，比 INRA[12]报道的类似的成熟阶段还要高，这可能是由于地域差异或者测定方法不同造成的。

反刍动物对饲料能量的消化吸收和利用比单胃动物复杂的多，瘤胃微生物发酵、消化道的消化吸收和生产动物产品的器官的转化效率都会影响反刍动物对饲料能量的利用。而且奶牛对各种饲料的利用率的差异也很大。因此，奶牛饲料不能只用消化能或者代谢能来评定，还要用净能(NE)加以矫正。饲料的泌乳净能的评定方法比较复杂，一般是以一定数量有代表性的饲料的实测数据为基础，回归出泌乳净能和消化能或代谢能的关系，根据回归公式计算饲料的泌乳净能。本试验中全株小麦单位 DM 的泌乳净能在抽穗开花期最低，乳熟期和蜡熟期最高。这主要是因为在成熟后期，随着小麦淀粉的沉积，非纤维性的营养物质含量增加，纤维素类物质的含量下降，因为高 NDF 的饲料比低 NDF 饲料的净能含量低，所以乳熟期蜡熟期有较高的泌乳净能。

随着植株的成熟，单株 DM 产量增加，特别是在乳熟期和蜡熟期迅速增加，这主要来自植株生物产量的增加和营养成分的沉积。在此基础上计算出的亩产量很高，在实际收割全株小麦时是达不到的，因为小麦种子发芽率、收割时的留茬高度和调制时的损失都会影响实际的产量。本试验的结果与许多的研究结果相一致，Edmisten 等[13]报道，蜡熟期阶段谷粒

贡献了 56%的小麦 DM 产量；Coblentz 等[14]报告，蜡熟期和谷粒成熟期，小麦穗贡献了 58%和 60%的 DM；Ashbell 等[15]研究了以色列全麦产量的变化，结果表明，从乳熟期到蜡熟期 DM 产量的增加约为 40%。这也说明，麦穗出现后，在籽粒灌浆过程中，小麦籽粒对牧草整体营养品质有相当大的贡献。

全株小麦在拔节期有最高的 RFV，抽穗期和开花期降低，乳熟期和蜡熟期升高。Xie 等[4]使用开花期、乳熟期和蜡熟期 3 个时期的全株小麦制作青贮饲料，乳熟期得到最高的 RFV，其次是蜡熟期和开花期。本试验中，蜡熟期的 RFV 高于乳熟期，这与 Xie 等[4]的结果不一致，可能是全株小麦的调制方式不同造成的，全株小麦调制成青干草时，一些水溶性化合物会在固化中损失，或者经过美拉德反应并入到 NDF 中。而青贮时乳酸发酵会使饲料中的碳水化合物发酵成乳酸，乳酸发酵会引起养分的流失，一些可能性养分也会溶解到青贮中，这些都会导致饲料营养价值的变化。

本试验中，品种对全株小麦的营养成分没有影响。可能与本试验中所用的 2 个品系小麦的遗传特性相近有关。

3.3　不同成熟阶段及品种对全株小麦的瘤胃降解特性的影响

DM 降解率是影响反刍动物 DM 采食量的重要因素，粗饲料的 DM 在瘤胃中降解率随着降解时间的延长会不同程度地增加，但不同品质的粗饲料降解率的增加幅度存在差异。粗饲料中的纤维类物含量(纤维素含量和木质化程度等)会影响饲料的降解特性，一般来说，相比于 NFC，纤维素的降解速率较慢，而木质素在瘤胃中很难被消化，不同牧草中的木质素还会与牧草中的其他营养成分结合，降低其他营养成分的降解率。随着小麦的生长，小麦的茎秆和叶片比例逐渐增大，叶片和茎秆老化，细胞壁成分增加，植株内的纤维素类成分的含量增加，降低各营养成分的降解速度，DM 降解率就会降低。而小麦开始灌浆后，随着籽粒中淀粉的沉积，更多的营养物质转移到容易被降解的籽粒中，成熟后期淀粉含量增加，纤维素类物质所占的比重下降，会大大提高全株小麦的瘤胃降解率。

牧草中蛋白质在瘤胃中被微生物利用产生 MCP，进入小肠被消化吸收。饲料中蛋白质发酵的难易程度和在瘤胃中的滞留时间决定了其在瘤胃中的降解率[16]。牧草中蛋白质主要是含氮化合物，存在于细胞内容物中，而细胞壁中纤维素的结构影响蛋白质的降解速度，随着植物的成熟老化，木质化程度加深也会影响氮的释放和分解。饲料中的蛋白质可分为快速降

解、慢速降解和不易降解 3 部分，不同饲料各部分所占的比例不同，回归公式中 a、b、c 的值即表示这 3 部分的含量。不同成熟阶段的全株小麦不易降解部分的含量很少，说明全株小麦中的绝大部分蛋白质都能在瘤胃中降解。从试验结果可以看出，全株小麦的 CP 瘤胃有效降解率受成熟阶段的影响很大。冷静等[17]与刘大林等[18]研究认为，牧草 CP 含量高有利于 CP 的降解，在本试验中，成熟过程中全株小麦的 CP 含量是逐渐降低的，而 CP 的有效降解率呈先降低后增高的趋势，也就是说，全株小麦开花前的 CP 有效降解率与冷静等[17]和刘大林等[18]的研究结果一致，在开花期后的 CP 有效降解率与之相反。这主要是因为开花期后，植株中大部分的蛋白质成分转移到小麦籽粒中去，小麦籽粒中纤维类物质含量和木质化程度很低，更容易被降解。

粗饲料中 NDF 的瘤胃降解率是评定粗饲料品质的重要指标之一。饲粮中的 NDF 在维持反刍动物正常反刍和瘤胃健康中发挥着重要作用。NDF 的组成不同，会影响 NDF 瘤胃降解率，所以不同饲料原料的 NDF 在瘤胃中的降解率不同。随着植株的成熟，叶片与茎的比率和茎的木质化程度(影响纤维的消化率)会发生改变，从而影响干草的纤维消化率和蛋白质组分[19-20]。木质素影响牧草纤维消化的程度和速度[21-23]，其影响程度取决于木质素的含量和组成[24-25]、组织分布[24]和酚类的功能[27]。木质素，因其特有的酚类成分，不能在厌氧条件下消化，并能减少牧草中潜在可消化纤维的比例[28]。因此本试验中，全株小麦的 NDF 有效降解率在拔节期最高，随着小麦的成熟 NDF 有效降解率下降，虽然乳熟期的 NDF 有效降解率显著低于拔节期和抽穗期，但是显著高于蜡熟期。这可能是因为蜡熟期小麦已经变得枯黄，木质化程度升高，小麦粒也开始发黄变硬，可能会潜在地降低 NDF 有效降解率。

全株小麦的 GE 有效降解率随着成熟度的变化与 NDF 含量相似，这也说明 NDF 的含量会影响瘤胃中饲料中能量的降解。

饲料在反刍动物瘤胃中的发酵产物和小肠中的消化产物是不同的，而且许多研究表明瘤胃 FOM 产量与瘤胃发酵产生的挥发性脂肪酸(VFA)以及 MCP 的产量呈正比[29-30]，因此饲料中有机物质在瘤胃中的降解率(FOM/OM)是评定饲料品质的重要参数。本试验中，全株小麦在拔节期有较高的有机物质降解率，抽穗开花期降低，而乳熟期和蜡熟期又显著增加。这说明灌浆后全株小麦本身有机物质会变得更加容易降解，这可能因为在开花期后小麦进入灌浆期，植株中的养分逐渐向小麦籽粒中转移，籽粒和籽粒中的养分特别是非纤维性的营养成分

在整个植株 DM 中所占的比例逐渐增加，这也印证了姜军等[31]和徐萍等[32]的研究。姜军等[31]和徐萍等[32]的研究表明，瘤胃表观有机物质降解量随着饲粮中精料含量的增加而增加，精料含量增多时，全消化道有机物表观消化率也会增加。但是，也有研究表明瘤胃有机物质和全消化道有机物的表观消化率不受饲粮有机物质含量的影响[33-35]；灌浆后全株小麦有机物会变得更加容易降解，也有可能是因为籽粒中的淀粉等容易被降解的营养物质在瘤胃中降解，可以为瘤胃微生物生长提供能量。Russell 等[36]的研究认为，瘤胃微生物的生长随着碳水化合物的发酵速度升高而加快，大量生长的瘤胃微生物又可以反过来分解更多的有机物。

3.4　不同成熟阶段及品种对全株小麦 RDP 和小肠蛋白质含量的影响

随着对反刍动物蛋白质营养的深入研究，传统的蛋白质体系已经不能完全解释反刍动物对蛋白质的消化代谢。饲粮中蛋白质经过反刍动物的瘤胃的降解后才进入小肠，此时蛋白质结构和数量已经发生改变，进入小肠中的蛋白质包括饲粮非降解蛋白质和瘤胃 MCP，如果考虑瘤胃微生物对饲粮蛋白质的降解和利用，就要以小肠蛋白质体系来评价饲粮的蛋白质营养。

饲粮中的蛋白质在瘤胃中的降解是影响反刍动物瘤胃发酵的重要因素之一，按照功能不同可以分为 RDP 和 RUP 2 部分，RDP 为瘤胃微生物的生长和 MCP 的合成提供必须的肽、氨基酸和氨等，而 RUP 不经过瘤胃降解，或者经瘤胃微生物分解但未利用，直接进入小肠，在小肠中与 MCP 一起被消化吸收，是反刍动物吸收利用蛋白质类营养物质的重要途径之一。有研究表明，奶牛对蛋白质营养需要量的 60%由 RDP 提供，40%由 RUP 提供[37]。控制反刍动物饲粮合理的 RDP 与 RUP 的比例，既能满足瘤胃微生物降解的需要又能使宿主得到充足的小肠氨基酸(RUP 可以为小肠利用提供氨基酸，是小肠氨基酸来源的第二大途径)。拔节期的全株小麦 RDP 和 RUP 含量都很高，说明此生长阶段的全株小麦中蛋白质含量较高，而且瘤胃微生物可以利用的蛋白质和不可利用的蛋白质含量都很高；在小麦成熟后期，RDP 的含量增加，而 RUP 的含量减少，说明全株小麦蛋白质组分中可被瘤胃微生物降解利用的部分增加，不被瘤胃微生物利用直接进入小肠的蛋白质组分减少。

不同饲料的 RDP 含量不同，会造成瘤胃 MCP 的合成数量存在差异。高蛋白质饲料比高能量饲料的 RDP 含量高，以 RDP 评定出的瘤胃 MCP 合成量就高，但用高能量饲料以 FOM 评定出的 MCP 合成量也很高。因此用 RENB 的原理来评价饲粮，才可以同时满足瘤胃微生

物对 RDP 和 FOM 的需要，使饲粮的配合更加合理。如果饲粮的 RENB 值为 0，表明平衡良好；如果饲粮的 RENB 值为负值，表明瘤胃 RDP 富余，能量(FOM)不足，应增加瘤胃中的 RDP；如果饲粮 RENB 值为正值，表明瘤胃 RDP 不足，能量(FOM)有富余，应增加瘤胃中的能量(FOM)。本试验结果表明，开花期前，全株小麦的 RDP 充足，FOM 不足，开花后则相反，在开花期，RENB 值接近 0，能氮平衡良好。与能氮平衡的结果相对应，在 RDP 富余的成熟阶段(拔节期和抽穗期，RENB<0)，小肠蛋白质和小肠可消化蛋白质的含量很高，FOM 富余的成熟阶段(开花期、乳熟期和蜡熟期，RENB>0)小肠蛋白质和小肠可消化蛋白质的含量降低，但是在这些阶段可降解的能量很高，能量有富余。

4 结 论

①不同品系全株小麦的差异较小，仅在几个指标中有显著差异，而且每个成熟阶段的全株小麦饲养价值都很高，但是不同成熟阶段的全株小麦的营养价值、产量和瘤胃降解特性存在显著的差异。

②从营养价值和瘤胃降解特性来看，拔节期、乳熟期、蜡熟期均优于抽穗开花期，而且乳熟期、蜡熟期有更高的 DM 产量。在华北地区，提前收割小麦可以减免病虫害和恶劣天气的风险，并且对下一季玉米的种植和产量有利。

参考文献：

[1] ADAMSON A H,REEVE A.Nutritional evaluation of whole-crop wheat[C]//STARK B A,WILKINSON J M.Whole-crop cereals.Aberystwyth:Chalcombe Publication,1992:85–96 .

[2] ARIELI A,ADIN G.Effect of wheat silage maturity on digestion and milk yield in dairy cows[J].Journal of Dairy Science,1994,77(1):237–243.

[3] CROVETTO G M,GALASSI G,RAPETTI L,et al.Effect of the stage of maturity on the nutritive value of whole crop wheat silage[J].Livestock Production Science,1998,55(1):21–32.

[4] XIE Z L,ZHANG T F,CHEN X Z,et al.Effects of maturity stages on the nutritive composition and silage quality of whole crop wheat[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2012,25(10):1374–1380.

[5] 冯仰廉.反刍动物营养学[M].北京:科学出版社,2004.

[6] (美)国家科学研究委员会.奶牛营养需要[M].孟庆翔,译.北京:中国农业大学出版社,2002.

[7] 冯仰廉.奶牛营养需要和饲料成分[M].3 版.北京:中国农业出版社,2007.

[8] 秦梦臻,沈益新.生育期对小麦全株青贮发酵品质的影响[J].中国农业科学,2012,45(8):1661–1666.

[9] THROOP H L.Nitrogen deposition and herbivory affect biomass production and allocation in an annual plant[J].OIKOS,2005,111(1):91–100.

[10] OLTJEN J W,BOLSEN K K BOLSEN.Wheat,barley,oat,and corn silages for growing steers[J].Journal of Animal Science,1980,51(4):958–965.

[11] BECK P A,STEWART C B,GRAY H C,et al.Effect of wheat forage maturity and preservation method on forage chemical composition and performance of growing calves fed mixed diets[J].Journal of Animal Science,2009,87(12):4133–4142.

[12] INRA.Alimentation des bovins,ovins et caprins[M].Paris:INRA,1988,476.

[13] EDMISTEN K L,GREEN J T,Jr,MUELLER J P,et al.Winter annual small grain forage potential: Ⅱ.Quantification of nutritive characteristics of four small grain species at six growth stages[J].Communications in Soil Science and Plant Analysis,1998,26(7/8):881–899.

[14] COBLENTZ W K ,COFFEY K PTURNER J E,et al.Effect of maturity on degradation kinetics of sod-seeded cereal grain forage grown in Northern Arkansas[J].Journal of Dairy Science,2000,83(11):2499–2511.

[15] ASHBELL G,WEINBERG Z G,HEN Y.Interactions between wheat and vetch during co-ensiling[J].Meshek Habakar Vehachalav,1997,272:20–22.

[16] 刁其玉,屠焰.奶牛常用饲料蛋白质在瘤胃的降解参数[J].乳业科学与技术,2005,27(2):70–74.

[17] 冷静,张颖,朱仁俊,等.6 种牧草在云南黄牛瘤胃中的降解特性[J].动物营养学报,2011,23(1):53–60.

[18] 刘大林,赵国琦,王学峰,等.豆科与禾本科牧草在山羊瘤胃内的降解率比较试验[J].四川畜牧兽医,2000,27(3):19,21.

[19] WEIR W C,JONES L G,MEYER J H.Effect of cutting interval and stage of maturity on the digestibility and yield of alfalfa[J].Journal of Animal Science,1960,19(1):5–19.

[20] YU P,CHRISTENSEN D A,MCKINNON J J,et al.Effect of variety and maturity stage on chemical composition,carbohydrate and protein subfractions,in vitro rumen degradability and energy values of timothy and alfalfa[J].Canadian Journal of Animal Science,2003,83(2):279–290.

[21]ALBRECHT K A,WEDIN W F,BUXTON D R.Cell-wall composition and digestibility of alfalfa stems and leaves[J].Crop Science,1987,27(4):735–741.

[22] VAN SOEST P J.Nutritional ecology of the ruminant[M].2nd ed.Ithaca,NY:Cornell University Press,1994.

[23] SEWALT V J H,NI W T,JUNG H G,et al.Lignin impact on fiber degradation:increased enzymatic digestibility of genetically engineered tobacco (*Nicotiana tabacum*) stems reduced in lignin content[J].Journal of Agricultural & Food Chemistry,1997,45(5):1977–1983.

[24] BUXTON D R,RUSSELL J R.Lignin constituents and cell-wall digestibility of grass and legume stems[J].Crop Science,1988,28(3):553–558.

[25] BUXTON D R ,BRASCHE M R.Digestibility of structural carbohydrates in cool-season grass and legume forages[J].Crop Science,1991,31(5):1338–1345.

[26] AKIN D E.Histological and physical factors affecting digestibility of forages[J].Agronomy Journal,1989,81(1):17–25.

[27] SEWALT V J H,GLASSER W G,BEAUCHEMIN K A.Lignin impact on fiber degradation.3.Reversal of inhibition of enzymatic hydrolysis by chemical modification of lignin and by additives[J].Journal of Agricultural and Food Chemisitry,1997,45(5):1823–1828.

[28] JUNG H G,ALLEN M S.Characteristics of plant cell walls affecting intake and digestibility of forages by ruminants[J].Journal of Animal Science,1995,73(9):2774–2790.

[29] 陈喜斌,冯仰廉.瘤胃 VFA 产量与瘤胃可发酵有机物质关系的研究[J].动物营养学报,1996,8(2):32–36.

[30] 冯仰廉.肉牛营养需要和饲养标准[M].北京:中国农业大学出版社,2000:7–10.

[31] 姜军,莫放,高博,等.日粮蛋白质补充料来源对肉牛消化道营养物质流量和表观消化率的影响[J].中国农学通报,2008,24(3):9–14.

[32] 徐萍,莫放,陈瑶,等.日粮精料进食水平对肉牛消化道营养物质流量和表观消化率的影响[J].中国草食动物,2007,27(4):12–15.

[33] BRODERICK G A.Effects of varying dietary protein and energy levels on the production of lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2003,86(4):1370–1381.

[34] ROTGER A,FERRET A,CALSAMIGLIA S,et al.Effects of nonstructural carbohydrates and protein sources on intake,apparent total tract digestibility, and ruminal metabolism in vivo and in vitro with high-concentrate beef cattle diets[J].Journal of Animal Science,2006,84(5):1188–1196.

[35] IVAN S K,GRANT R J,WEAKLEY D,et al.Comparison of a corn silage hybrid with high cell-wall content and digestibility with a hybrid of lower cell -wall content on performance of holstein cows[J].Journal of Dairy Science,2005,88(1):244–254.

[36]RUSSELL A D.Mycobactericidal agents[C]//RUSSELL A D,HUGO W B, AYLIFFE G A J.Principles and practice of disinfection,preservation and sterilization.2nd ed.Oxford:Blackwell Scientific,1992:246253.

[37] 杨效民,李军,闫春轩,等.奶牛瘤胃非降解蛋白质日粮应用研究[J].山西农业科学,1997,25(4):80–83.

Effects of Different Maturity Stages and Breeds on Nutritional Components and Rumen Degradation Characteristic of Whole Crop Wheat

HU Zhiyong　ZHANG Tian　WANG Jinxin　DONG Xusheng　LIN Xueyan*　WANG Zhonghua*

（*College of Animal Science and Technology, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*）

Abstract: This experiment was conducted to study effects of different maturity stages and breeds on nutritional components and rumen degradation characteristic of whole crop wheat, and to provided reference and guidance for the application of whole plant wheat in dairy cattle diets. The

experiment used two varieties of wheat which were *ShanNong* 22026(SN22026) and *ShanNong* 82567 (SN82567). Samples were collected from late March to mid June at 2015. The contents of dry matter (DM), crude protein (CP), starch, crude ash (Ash), organic matter, neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), acid detergent lignin (ADL) and relative feed value were measured, and rumen degradability of wheat was measured use three fistula Holstein cows with a weight of about 500 kg. The results showed as follows: 1) the DM content of whole crop wheat in dough stage was significantly higher than that in other stages (P<0.05). The CP content of whole crop wheat gradually decreased during maturation, and remained stable after flowering stage. With the maturity of wheat, the contents of NDF, ADF and ADL in whole crop wheat showed the trend of increased firstly and then decreased. 2) With the maturity of wheat, the gross energy of dry matter of whole crop wheat showed a decreased trend, and the net energy of lactation showed the trend of decreased firstly and then increased. 3) The effective degradabilities of DM, CP and NDF of whole crop wheat were highest in the jointing stage, and significantly decreased in heading stage and flowering stage (P<0.05), then significantly increased in milk stage and dough stage (P<0.05). 4) The rumen degradation protein (RDP) content of whole crop wheat was highest in jointing stage and significantly higher than that in other stages (P<0.05), then significantly decreased in heading stage (P<0.05), and decreased to lowest in flowering stage (P<0.05), and gradually increased after flowering stage (P ＞ 0.10). The rumen undegraded protein content decreased gradually with wheat maturity, the lowest value was in dough stage and significantly lower than that in other stages (P<0.05). In conclusion, comparison of two species of whole crop wheat, only a few indices have significant differences. Moreover, each mature stage of the whole crop wheat breeding value is very high, however, the nutritional value, yield and rumen degradability characteristics of whole plant wheat in different maturity stages have significantly different.

Key words: whole crop wheat; cow; nutritional components; rumen degradation rate

---

*Corresponding authors: LIN Xueyan, professor, E-mail: linxueyan@sdau.edu.cn; WANG Zhonghua, professor, E-mail: zhwang@sdau.edu.cn （责任编辑　武海龙）